

*В.С. Труш, к.т.н., І.М. Погрелюк, д.т.н.,  
О.Г. Лук'яненко, к.т.н., Т.М. Кравчишин, к.т.н.  
(Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна)*

### **Підвищення втомної довговічності титану азотуванням та науглецюванням**

*Встановлено оптимальні параметри модифікованого приповерхневого шару (твердість поверхні та глибина модифікованого шару) для сплаву VT1-0 насиченого азотом або вуглецем, які підвищують його втомну довговічність. Показано дислокаційну структуру модифікованого шару.*

Завдяки таким властивостям, як висока питома міцність, корозійна тривкість титан і сплави на його основі є перспективними конструкційними матеріалами, зокрема для авіації, де заміна сталевих деталей на титанові призводить до суттєвого зниження маси конструкцій [1-3]. Висока хімічна спорідненість титану до елементів проникнення (O, N, C) призводить до формування модифікованого приповерхневого шару, що істотно впливає на експлуатаційні властивості виробу в цілому [4-6]. Перспективним засобом покращення фізико-механічних властивостей титану є дифузійне насичення з контрольованих газових середовищ [6-7], для якого характерні відтворюваність процесу, можливість обробляти деталі довільної форми, навіть з отворами, висока адгезія модифікованих шарів до матриці завдяки можливості формування глибокого дифузійного підшару. Отож, метою роботи є встановити вплив дифузійного насичення азотом або вуглецем із газового середовища на довговічність зразків титану VT1-0 за чистого згину.

На зразках титану VT1-0 формували поверхневі модифіковані шари завглибшки 30...70 мкм з різним відносним приростом твердості поверхні (ВПП)  $5\% < K < 100\%$  ( $K = ((H^{пов} - H^{серц}) / H^{серц}) \cdot 100\%$ , де:  $H^{пов}$  – твердість поверхні;  $H^{серц}$  – твердість серцевини титану).

Для випробувань чистим згином використовували плоскі зразки з шириною робочої частини 3 мм, товщиною 1 мм (рис. 1).

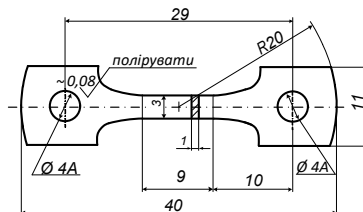


Рис. 1. Зразок для випробувань чистим згином.

Для азотування використовували газоподібний азот технічної чистоти (ГОСТ 9293–74), що містив, згідно з ТУ, кисню не більше 0,4 об. % і парів води не більше 0,07 г/м<sup>3</sup>. Насичувальним середовищем для науглецювання титану

служувала газова суміш аргону з пропаном, об'ємний вміст якого складав 16,7% суміші (83,3 об.% Ar +16,7 об.% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>).

На титанових зразках обробкою у вуглецевмісному газозовому середовищі сформовано модифіковані шари з різним ВПТП:  $K = 55\%$ ,  $K = 75\%$ ,  $K = 90\%$  та випробувано чистим згиним. Установлено залежність втомної довговічності титану VT1-0 за симетричного чистого згину від ВПТП –  $K$ . За результатами досліджень, найбільший приріст втомної довговічності зафіксовано за  $K = 90\%$  (глибини модифікованого шару 50 мкм), тому цей ВПТП приймаємо за оптимальний, за якого приріст довговічності становить  $\delta N = 30\%$  за амплітуди деформації циклу  $\pm \varepsilon_a = 0,6\%$  (рис. 2 а).

Установлено залежність втомної довговічності титану VT1-0 за чистого згину від ВПТП  $K$  (насичення з азотовмісного газозового середовища). Найбільший приріст втомної довговічності,  $\delta N = 22\%$  за амплітуди деформації циклу  $\pm \varepsilon = 0,6\%$  (рис. 2 б), зафіксовано за  $K = 80\%$ , тому даний рівень ВПТП прийнято за «оптимальний».

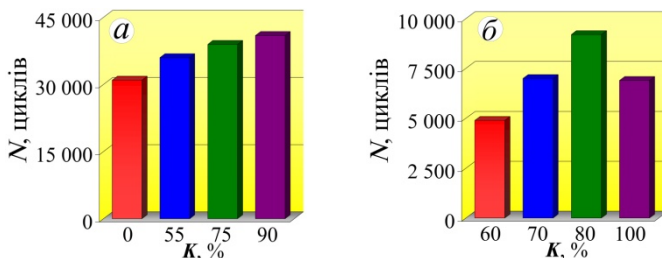


Рис. 2. Втомна довговічність за чистого згину (амплітуда деформації  $\pm \varepsilon_a \leq 0,6\%$ ) азотованого (а) та науглеченного (б) титану VT1-0 з різним  $K$ .

За результатами трансмісійної електронної мікроскопії показано, що зміна ВПТП  $K$  формує тонку структуру певного типу рис. 3.

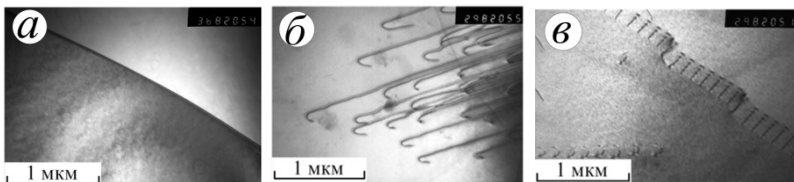


Рис. 3. Мікроструктура титану VT1-0 з різним рівнем ВПТП ( $K$ ) після насичення з вуглецевмісного (б) та азотовмісного (в) газозових середовищ: а –  $K = 0\%$  (перед ХТО), б –  $K = 90\%$ , в –  $K = 80\%$ .

У мікроструктурі титану VT1-0 при  $K = 0\%$  немає дефектів і по тілу зерна, і на його межах (рис. 3 а). При «оптимальному» модифікуванні вуглецем ( $K = 90\%$ ) формується впорядкована дислокаційна структура (рис. 6.7 б) у

вигляді дислокаційних петель. При «оптимальному» модифікуванні азотом ( $K = 80\%$ ) формується впорядкована дислокаційна структура у вигляді плоских скупчень дислокацій. Відповідно до літературних даних впорядкована дислокаційна структура має вищу енергоємність руйнування [8].

### Висновки

Встановлено параметри модифікованих приповерхневих шарів металу (відносний приріст твердості поверхні –  $K$ , глибина модифікованого шару –  $l$ ) для сплаву титану VT1-0, сформованих дифузійним насиченням з азото- та вуглецевмісних газових середовищ. За цих параметрів формуються впорядковані дислокаційні структури, які забезпечують підвищення на 20...30% втомної довговічності за випробувань чистим згином. Показано, що на титані VT1-0 за «оптимального» відносного приросту твердості поверхні при азотуванні ( $K = 80\%$ ) і науглецюванні ( $K = 90\%$ ) формуються впорядковані дислокаційні структури у вигляді плоских скупчень та петель відповідно.

### Список літератури

1. Lütjering G. and Williams J. C. Titanium, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag Heidelberg, 2007, 442 p.
2. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry / Inagaki I., Takechi T., Shirai Y., Ariyasu N. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2014, no. 106, p. 22-27.
3. Güleriyüz H., Atar E., Seahjani F., and Çimenoglu H. An overview on surface hardening of titanium alloys by diffusion of interstitial atoms. *Diffus. Found.* 2015, vol. 4, pp. 103–116, doi: 10.4028/www.scientific.net/df.4.103.
4. Kolomenskii A.B., Kolachev B.A., Degtyarev A.V., and Roshchupkin A.N. Effect of the depth of removal of the gas-saturated layer on repeated static endurance and activity of OT4 and VT6ch titanium alloys, *Soviet Mater. Sci.*, 1992, vol. 27, no. 3, pp. 233–236.
5. Kolachev B.A., Mal'kov A.V., and Sedov V.I. Effect of carbon on structure and plasticity of beta titanium alloys. *Metal Sci. Heat Treatment*, 1975, vol. 17, no. 3, pp. 226–228.
6. Fedirko V. M., Luk'yanenko A. G., Pohrelyuk I. M., and Trush V. S. Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment. *Materials Performance and Characterization*. 2017, vol. 6, no. 4, pp. 642-655.
7. Fedirko V. N., Luk'yanenko A. G., Trush V. S. Solid-Solution Hardening of the Surface Layer of Titanium Alloys. Part 1. Effect on Mechanical Properties. *Metal Science and Heat Treatment*. 2014, vol. 56, iss. 7, pp. 368–373.
8. Погребна Н. Е., Куцова В. З., Котова Т. В. Механічна стабільність матеріалів: навчальний посібник. Дніпро: НметАУ, 2021. 109 с.